

微気象学的スケールにおける 大気水蒸気同位体組成の空間構造

The Spatial Structure of Isotopic Composition of Atmospheric
Water Vapor at Micrometeorological Scale

清水 亮介*・山中 勤**

Ryosuke SHIMIZU* and Tsutomu YAMANAKA**

I はじめに

豪雨や早魃などの自然災害を引き起こす降水量変動機構の解明には、大気中の水循環過程、特に降水の起源となる水蒸気の輸送経路や供給源に関する知見が不可欠である。大気中の水循環をトレースする上で、水の安定同位体は有力なツールであり、近年さまざまな研究が行われてきた。山中ほか(2001)は関東平野の夏期の対流性降雨における同位体組成の空間分布特性が、異なる起源(すなわち、海洋起源と陸域起源)の水蒸気の混合によってもたらされている可能性を指摘した。しかし、水蒸気同位体組成の空間分布の実測は行われていない。

大気水蒸気同位体は Yakir and Wang (1996) による“Keeling plot”を用いた解析以降、主に蒸発散フラックスの成分分離を目的として使用されてきている。例えば、Moreira *et al.* (1997) ではアマゾン川流域内の植生の異なる環境下(草地と森林)で水蒸気のサンプリングを行い、その同位体組成から大気中への水蒸気輸送のほとんどが蒸散によるものであるという結果を導き出した。

また、He and Smith (1999) は航空機を用いて大気境界層内外の水蒸気サンプリングを行い、蒸発散によって森林から大気へ供給される水蒸気同位体組成を推定した。綱川・山中(2005)では蒸発散フラックスにおける蒸散の寄与が、LAIの上昇とともに増大することを示した。しかし、いずれの研究も鉛直次元の水蒸気輸送に焦点を当てているものであり、三次元的な分布や混合プロセスに言及した研究は例を見ない。

そこで本研究では、関東平野の降水における陸域起源水蒸気同位体組成の寄与を明らかにするための基礎研究として、大気水蒸気同位体組成の土地被覆による違いや、水蒸気混合プロセスについての考察を行うことを目的として、複数の地点配置で水蒸気のサンプリングを行った。

II 研究方法

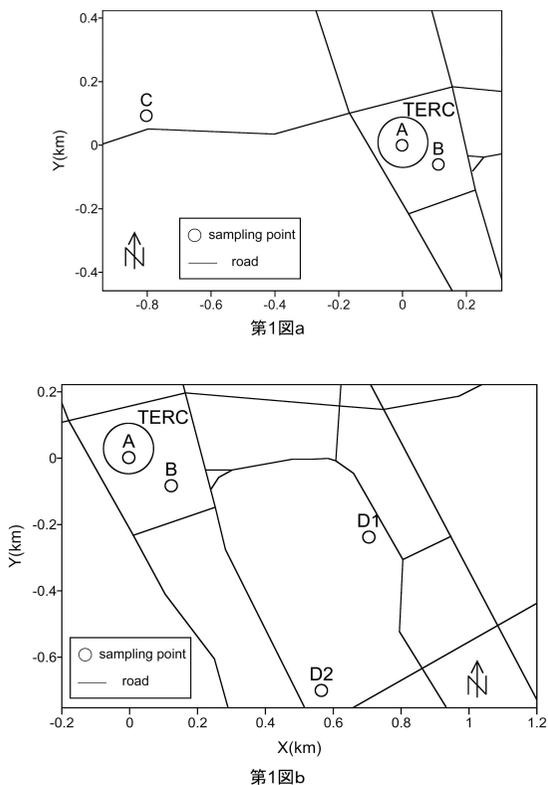
1. サンプリング地点

同位体分析のための水蒸気サンプリングは2つの地点配置で行った(第1図)。気象学の一般的なスケール区分によれば、これらの空間スケール

* 筑波大学生命環境科学研究科大学院生

** 筑波大学陸域環境研究センター

ルはマイクロスケールに分類される (Orlanski, 1975). ここでは便宜上これらの地点配置をそれぞれマイクロスケール a 及びマイクロスケール b と呼ぶ. マイクロスケール a (第 1 図 a) でのサンプリングは, 主に鉛直方向のデータを充実させることを目的とし, 筑波大学陸域環境研究センター (以下 TERC) の草地タワー (3 高度: 1 m, 12 m, および 30 m), 松林タワー (2 高度: 1 m および 26 m) 及び近隣の水田 (高度 1 m) で行った. マイクロスケール b (第 1 図 b) では TERC の 2 地点に加えて, 筑波大学の研究棟 (総合研究棟 A 及び自然系学系棟 B 棟) の屋上でサンプリングを行った. マイクロスケール b を考慮したのは, より高い高度での空間分布データを充実させるためである.



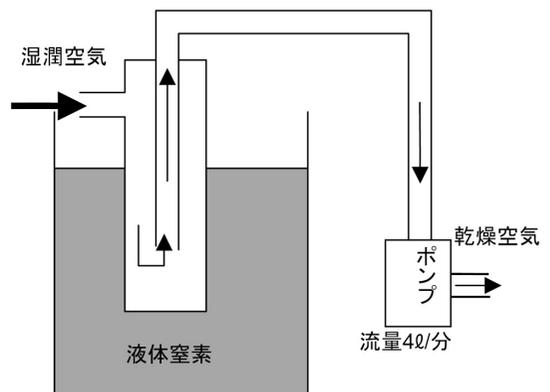
第 1 図 サンプリング地点配置 (A: 草地タワー, B: 松林タワー, C: 水田, D1: 総合研究棟 A 棟, D2: 自然系学系棟 B 棟)

2. サンプリングと同位体分析

水蒸気のサンプリングは低温凝結法 (綱川・山中, 2005) を用いて行った. 実験に供した装置の模式図を第 2 図に示す. エアーポンプ (SIBATA: MP-2N) によって空気を吸引し, その中に含まれる水蒸気を液体窒素 (-196°C) で冷却したトラップ管内に凝結させ, 採取した. 低高度でのサンプリングは地上 1 m に統一し, 三脚で吸引用チューブを固定した. TERC の草地タワーと松林タワーについては, チューブをタワー上部まで引き上げ, 地上で空気を吸引して水蒸気を捕捉した. 他の高高度サンプリングについては, 屋上に三脚を設置し, 地上 1 m と同様にサンプリングを行った.

水蒸気サンプリングと同時に, 気温と湿度の測定を併せて行った. ポンプ (EMP: CM-15) によって通風する密閉容器の中に, 温湿度計付きのデータロガー (Onset: HOBO RHTemp) を入れ, 気温と相対湿度を 1 分間隔で測定した. これらの測定値から水蒸気混合比を計算した.

A 地点ではサンプリング実施日に土壤水のサンプリングを行った. 土壤水は表層 3 cm の土壤をスコップで 100 cc ほど採取し, 遠心分離法によって土壤水を抽出した. 遠心分離は pF4.3 相当の回転数で 2 時間行った. 土壤の乾燥状態により, この方法では抽出できないものもあったが, それに



第 2 図 水蒸気トラップ装置模式図

については欠測とした。

採取した水蒸気サンプルと土壌水の同位体組成は、筑波大学大学院生命環境科学研究科の同位体比質量分析計（Thermo Finnigan：MAT252）で測定した。試水の前処理は、水素については白金触媒を用いた水素ガス平衡法、酸素については二酸化炭素平衡法によって行った。なお、測定結果は標準平均海水 V-SMOW からの千分率偏差、すなわち δ 値表記を用いて記述する。同位体分析の誤差は、 δD で $\pm 1\%$ 、 $\delta^{18}O$ で $\pm 0.1\%$ である。網川・山中（2005）では低温凝結法によって採取された水蒸気の $\delta^{18}O$ の精度に問題があることが報告されているため、以下の解析では主に δD の値を使用して行った。

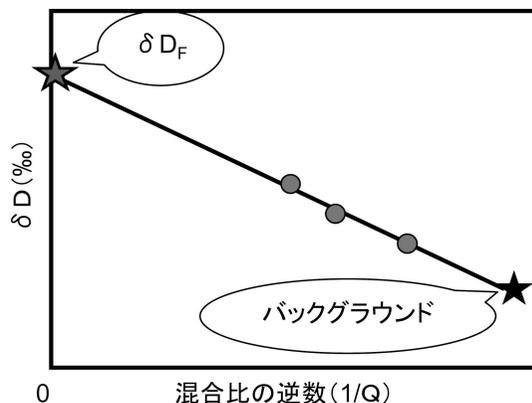
サンプリングの実施日と採取時間帯をまとめて第 1 表に示す。なお草地タワーの水蒸気混合比を計算するため、陸域環境研究センターのルーチン観測データから、3 高度（1.2 m, 12.0 m, 29.5 m）の気温と相対湿度、および気圧のデータを使用した（URL: <http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/hojyo/Japanese/database.html>）。

第 1 表 サンプリング日時一覧

番号	日付	開始時刻	終了時刻
1	2004 年 4 月 16 日	11:30	13:00
2	4 月 16 日	14:30	16:00
3	4 月 26 日	14:00	16:00
4	6 月 10 日	14:00	15:30
5	6 月 14 日	15:00	16:30
6	6 月 24 日	14:30	16:00
7	7 月 1 日	14:00	15:00
8	7 月 19 日	12:00	13:30
9	7 月 22 日	11:00	12:00
10	7 月 22 日	12:00	13:00
11	7 月 26 日	11:00	12:00
12	7 月 26 日	12:00	13:00
13	8 月 6 日	11:00	12:00
14	8 月 6 日	12:00	13:00
15	8 月 10 日	11:00	12:00

3. 解析方法

水蒸気の起源や混合様式を把握するため、Keeling plot (Keeling, 1961; Yakir and Wang, 1996) を用いた解析を実施した。この解析手法は、He and Smith (1999) によって示された Mixing Line Method と導出の過程は異なるものの、本質的には同じ解析手法であり、陸域から大気への水蒸気フラックス（蒸発散フラックス）の同位体組成 (δF) を求めることができる。具体的には、複数点での水蒸気同位体組成 (δ) と水蒸気混合比 (Q) を求め、それを $\delta - 1/Q$ のダイアグラムにプロットする（第 3 図）。この手法では、バックグラウンド大気（概ね混合層もしくはそれ以上の大気層に相当）にもともと存在する水蒸気（以下、バックグラウンド水蒸気）と地表面からの蒸発散フラックスによって新たに供給される水蒸気（以下、ローカルソース水蒸気）とが混合する過程を想定しており、バックグラウンド水蒸気同位体組成が広域的に一様であり、かつローカルソース水蒸気が同位体的に 2 種類存在する場合、地表付近の大気水蒸気のデータは図のように 2 つの傾向線上もしくはその間にプロットされ、その傾向線を外挿して得られる Y 切片の値が δF となる。

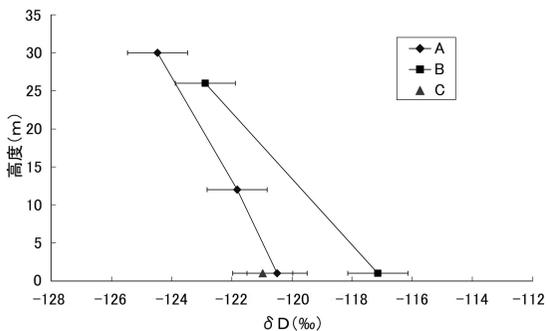


第 3 図 Keeling plot の模式図

III 結果と考察

1. 異なる土地被覆上での鉛直分布

マイクロスケール a では計 4 回の水蒸気サンプリングを行った。代表として 2004 年 6 月 10 日の δD 鉛直プロファイルを示す。他の観測結果とも共通して言えることは、高度が大きくなるにつれて δ 値が低下するということである。一般に、水蒸気が凝結や降水によって取り除かれる場合は、同位体的に重い水蒸気が優先的に取り除かれるため、水蒸気同位体組成は上空にいくほど軽い (He and Smith, 1999)。本研究の結果もこの傾向が顕著に現れている。地上 1 m に注目すると、草地と水田はよく一致しているが、松林は草地と 150 m 程度しか離れていないにもかかわらず値が異なっている。このような結果は乱流混合の違いによるものと考えられる。すなわち、草地や水田のように周囲が開けている環境では周囲や上空との水蒸気混合が起こりやすいが、松林のキャノピー内部は外部との混合が起こりにくい。このため、松林のキャノピー内では水蒸気同位体組成が異なると考えられる。一方、キャノピーの上 (高度 26 m) の水蒸気同位体組成は、草地 30 m のものとおおむね一致し、よく混合されていると考えることができる。

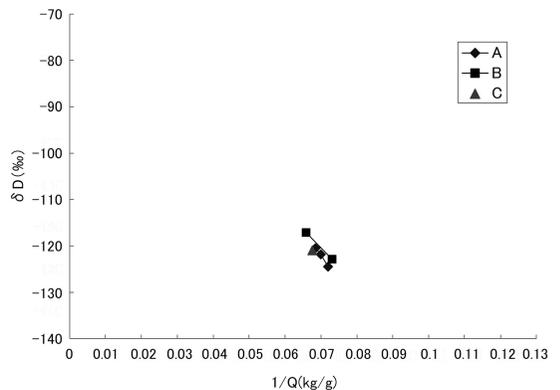


第4図 マイクロスケール a における δD の鉛直プロファイル (6/10)
(A:草地タワー, B:松林タワー, C:水田)

6月10日の測定データを用いた Keeling plot を第5図に示す。なお、Keeling plot の横軸は混合比の逆数を取っているため、相対的に水蒸気量が多い低高度のデータは左寄りにプロットされる。全てのデータが概ね一直線状にプロットされており、同位体組成が一般的なバックグラウンド大気中の水蒸気と同位体的に均質な地表面起源の水蒸気とが混合することによって、地上付近の大気水蒸気同位体組成が決定されていることがうかがえる。ここで、松林内の高度 1 m におけるデータに注目してみると、やや左上にシフトしているように見える。この Keeling plot 上では、右下部にバックグラウンド水蒸気、左上部にローカルソース水蒸気が位置することになるため、上述のシフトはローカルソース水蒸気側に寄っていることになる。以上から、周囲との水蒸気混合が起きにくいような地点では、他の地点と比較してローカルソース水蒸気を多く含み、その同位体組成に近くなることが示唆された。

2. 高高度での空間分布特性

マイクロスケール b でのサンプリングにおける δD の鉛直プロファイルを示す。その結果を見ると、多少の差異はあるものの、ほぼ同位

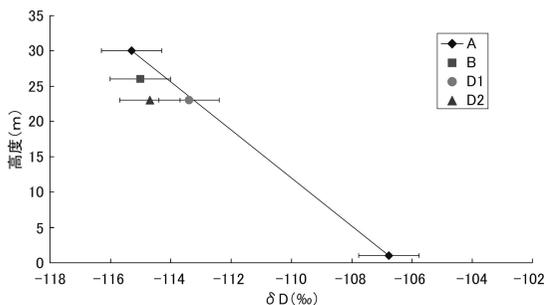


第5図 マイクロスケール a の Keeling plot (6/10)
(A:草地タワー, B:松林タワー, C:水田)

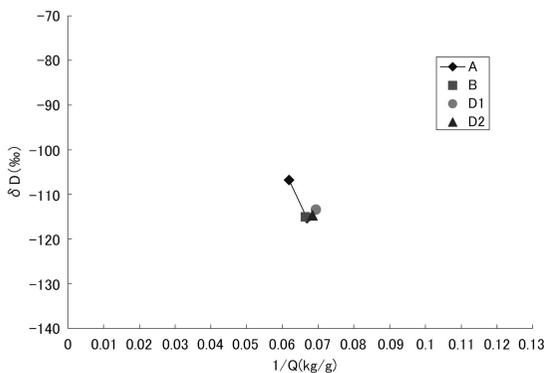
体分析の誤差範囲内で高高度の δD 値が一致している。また同実験についての Keeling plot (第7図)では、プロット全体がほぼ一つの直線上に位置している。これらの特徴は少なくとも20 m以上の高度においては同位体組成の空間的差異が小さくなるとともに、バックグラウンド水蒸気と同位体的な一様性が保たれている結果であると考えられる。

3. マイクロスケールにおけるバックグラウンド水蒸気とローカルソース水蒸気

A 地点ではすべてのサンプリング実施日において高度1 mと30 mでの水蒸気サンプリングが行われている。それぞれの高度の δD 値と土壤水の δ



第6図 マイクロスケールbにおける δD の鉛直プロファイル (6/24)
(A: 草地タワー, B: 松林タワー, D1: 総合研究棟A棟, D2: 自然系学系棟B棟)

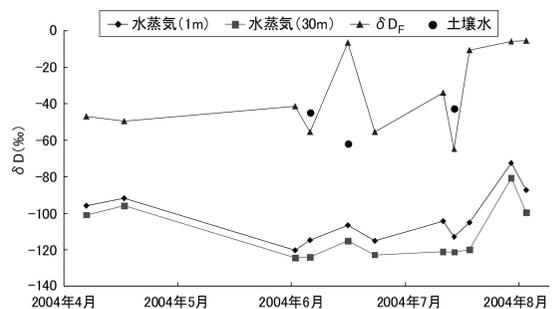


第7図 マイクロスケールbのKeeling plot (6/24)
(A: 草地タワー, B: 松林タワー, D1: 総合研究棟A棟, D2: 自然系学系棟B棟)

D値および Keeling plot から求められた蒸発散フラックスの同位体組成 (δD_F) の時系列を第8図に示す。この図において、水蒸気の δD 値に単純な季節変化は見られず、日々変動が大きいことがわかる。地上1 mの水蒸気は低い高度ではあるが、地上からもたらされた蒸発散フラックスである δD_F 値よりはむしろ30 mの水蒸気の δD 値に近い。地上1 mと30 mの δD 値はほぼ一定間隔で推移しており、たとえ地上1 mという低い高度であっても、バックグラウンド水蒸気と同位体組成を強く反映するということが分かる。このことから、地上付近の水蒸気におけるこの日々変動は地表面からもたらされた水蒸気の影響ではなく、バックグラウンド水蒸気そのものが同位体組成の異なる気団の流入などにより大きく変動することに原因があると考えられる。

δD_F 値は一部で大きな値を示すものの概ね土壤水の δD 値の変動幅(-40~-60‰)に収まっている。このことから、実験期間中においては、ローカルソース水蒸気と同位体組成は安定しており、土壤水の値に近いことから同位体分別の起こらない蒸散がソースの水蒸気として常に卓越していることが示唆される。

Keeling plot 解析は外挿によって δD_F 値を推定するため、水蒸気混合比と同位体組成の測定精度によっては δD_F 値を大きく変動させてしまう。7月と8月において大きな δD_F 値を示した原因と



第8図 草地タワー(A地点)における水蒸気と土壤水の δD と δD_F の時系列

してはサンプリング高度と気温湿度観測高度のずれの影響が考えられる。A 地点では TERC のルーチン観測データの気温湿度を使用して混合比を計算している。サンプリング地点の草地は4月から6月にかけては草丈が低かったが、7~8月になると草の成長によって地上1 mのサンプリング高度が周囲のキャノピーよりも低くなっていた。気温湿度の測定高度は1.6 mでキャノピーの上部であったため、A 地点の1 m 高度においては水蒸気混合比の過小評価があったものと考えられる。1 m 高度における水蒸気混合比の過小評価は Keeling plot 解析において直線の傾きを大きくし、 δD_F 値の過大評価につながる。正確な水蒸気混合比の測定と、観測高度を増やすことでこの問題は解決できる。

IV まとめ

以上の結果をまとめると、微気象学的スケールでは、同位体的に均質なバックグラウンド水蒸気と1種類のローカルソース水蒸気との混合、すなわち鉛直一次元の二成分混合によって地上レベルの大気水蒸気同位体組成が決まる。その際にバックグラウンド水蒸気同位体組成の影響をより強く受ける。また、ローカルソース水蒸気同

位体組成は空間的に均質化されており、地表状態の差異の影響は小さい。そのため2 km以内のスケールにおいて水蒸気同位体組成は水平方向に大きな差異は示さない。ただし、キャノピー内部のように周囲との水蒸気混合が起こりにくい場合にはバックグラウンド水蒸気の影響が小さくなり、ローカルソース水蒸気の影響が強く反映されることもある(第9図)。

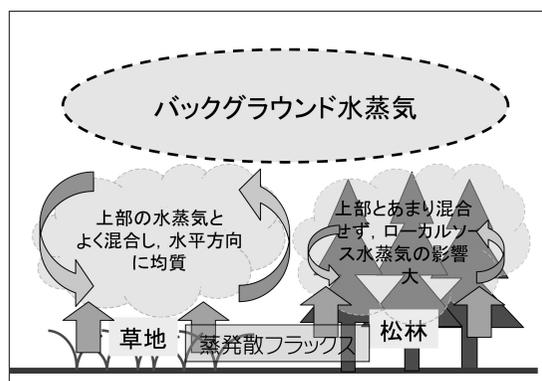
さらに広いスケールについては別報にて論じる予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導、ご助言をいただいた筑波大学水文科学分野の諸先生方に感謝いたします。特に、田中 正教授には TERC 松林タワーの使用を許可していただき、飯田真一博士にはタワーの使用にあたり便宜を図っていただきました。水蒸気サンプリングの遂行にあたっては、教育研究科理科教育コースの綱川明芳氏、自然学類地球科学専攻4年(当時)の涌井久司氏、角張順一氏にお手伝いいただきました。同位体分析については陸域環境研究センターの薮崎志穂氏にご協力、ご助言をいただきました。ここに記し厚く御礼申し上げます。

文献

- 綱川明芳・山中 勤(2005): 安定同位体分析のための大気水蒸気サンプリング手法の信頼性. 水文水資源学会誌, **18**, 306-309.
- 山中 勤・嶋田 純・宮岡邦任(2001): 関東平野における暖候期のイベント降水同位体組成の時空間変動. 日本水文科学会誌, **31**, 123-133.
- He, H. and Smith, R. B. (1999): Stable isotope composition of water vapor in the atmospheric boundary layer above the



第9図 マイクロスケールにおける水蒸気同位体組成の空間構造の模式図

- forest of New England. *J. Geophys. Res.*, **104**, 11657-11673.
- Keeling, C. D. (1961): The concentration and isotopic abundance of carbon dioxide in rural and marine air. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **24**, 277-298.
- Moreira, M., Sternberg, L. da S. L., Martinelli, L. A., Victoria, R. L., Barbosa, E. M., Bonates, L. C. M. and Nepstads, D. C. (1997): Contribution of transpiration to forest ambient vapor based on isotopic measurements. *Global Change Biology*, **3**, 439-450.
- Orlanski, I. (1975): A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **56**, 527-530.
- Yakir, D. and Wang, X. F. (1996): Fluxes of CO₂ and water between terrestrial vegetation and the atmosphere estimated from isotope measurements. *Nature*, **380**, 515-517.
- (2005 年 5 月 31 日受付, 2005 年 8 月 23 日受理)